

Промышленное применение электронных пушек с плазменным катодом.

Н.Г.Ремне

Общество с ограниченной ответственностью «ЭЛИОН»

634034, Томск, Россия.

E-mail: *remnik@fet.tusur.ru*

Представлено описание, принцип действия, конструкции и характеристики электронных пушек с плазменным катодом. Приведен опыт применения пушек в составе автоматических поточных линий электронно-лучевой сварки. Описано использование пушек в установках для электронно-лучевой наплавки композитных порошковых материалов.

Введение

В последние годы в отечественной промышленности наблюдается процесс возврата к высокоэффективным технологиям, созданию которых в прошлом во многом способствовало развитие оборонной промышленности. Термическое воздействие на материалы и сплавы электронными пучками относится к таким технологиям. В настоящее время сложилась благоприятная ситуация для внедрения в промышленность электронно-лучевого оборудования, в том числе на основе пушек с плазменным катодом. Это обусловлено, во-первых, недостаточным для удовлетворения спроса объемом выпускаемого в России оборудования на основе термокатодных пушек. Во-вторых, существует возможность дальнейшего развития фундаментальных и прикладных исследований в этой области, необходимая для совершенствования параметров пушек. Эта возможность связана с появлением государственных и региональных программ финансирования инновационных разработок.

Электронные пушки, применяемые в промышленности для термического воздействия на материалы и сплавы, должны обеспечивать стабильные энергетические и пространственные параметры электронного пучка в течение длительного времени. В реальных условиях промышленного производства действует целый ряд дестабилизирующих факторов, таких как «технический» вакуум, направленный парогазовый поток из области расплава, частые разгерметизации рабочей камеры установки, в том числе и аварийные. В этих условиях пушки с плазменным катодом, не имея накаливаемых деталей, дают возможность поддерживать постоянными параметры электронного пучка более простыми способами, чем термокатодные пушки.

Результаты многочисленных исследований и опыт эксплуатации электронных пушек с плазменным катодом в различных условиях позволил выявить их технологические возможности и определить наиболее целесообразные области применения. Показано в частности, что высокая эмиссионная способность плазмы обеспечивает генерацию электронных пучков, которые по яркости и плотности мощности

находятся на уровне термокатодных пушек [1-3]. Пушки с плазменным катодом не теряют работоспособность при воздействии паров металлов, в том числе тугоплавких, и газовых выбросов из зоны сварки, имеют большой ресурс, просты в обслуживании. Совокупность этих свойств позволяет использовать пушки с плазменным катодом в традиционных сварочных процессах. Кроме того, на их основе разрабатываются так называемые технологии реновации (упрочняющая наплавка, нанесение покрытий), которые в условиях экономии дорогостоящих материалов приобретают особое значение.

Ниже приведено описание принципа действия пушек и некоторых наиболее успешных конструкций для промышленного применения.

Отражательный разряд с полым катодом как эффективный генератор плазмы.

В электронных пушках с плазменным катодом используется способность плазмы испускать при определенных условиях электроны за пределы плазменного образования [1]. Плазменный эмиттер электронной пушки это, как правило, газоразрядное устройство, генерирующее плазму, из которой электроны через канал в одном из электродов выходят в вакуумный или газовый промежуток. При наличии внешнего электрического поля (поля ускоряющего электрода) электроны ускоряются и формируются в пучок.

Одним из наиболее эффективных электронных эмиттеров является плазма разряда

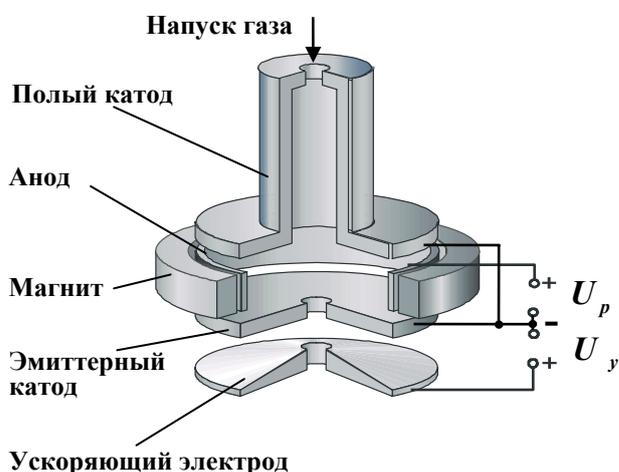


Рис. 1. Электродная схема отражательного разряда с полым катодом.

с полым катодом, эмиссионные и ионизационные процессы в котором инициируются дополнительным отражательным разрядом [2,3]. В такой комбинации разрядов обеспечиваются требуемые характеристики горения разряда с полым катодом, а также относительно просто реализуется необходимое условие работы плазменного эмиттера – возможность автоматического повторного инициирования при случайном погасании разряда с полым катодом.

Электродная система отражательного разряда с полым катодом содержит три изолированных «холодных» электрода (рис. 1): полый катод, анод и эмиттерный катод, в большинстве случаев имеющий потенциал полого катода. В разрядной камере создается магнитное поле, катоды являются элементами магнитной цепи. В эмиттерном катоде имеется эмиссионный канал, в котором при наличии внешнего электрического поля

локализуется плазменная поверхность. Выходящие из плазмы электроны попадают в высоковольтное электрическое поле и ускоряются в нем.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований [2-5] позволили изучить физические процессы в отражательном разряде с полым катодом и оптимизировать геометрию разрядной камеры и режимы горения разряда.

Конструкции электронных пушек, применяемых в поточном производстве.

Разработан ряд электронных пушек с плазменным катодом, удовлетворяющих требованиям промышленного, в том числе поточного производства. Основным и наиболее сложным по устройству узлом электронной пушки является разрядная камера.

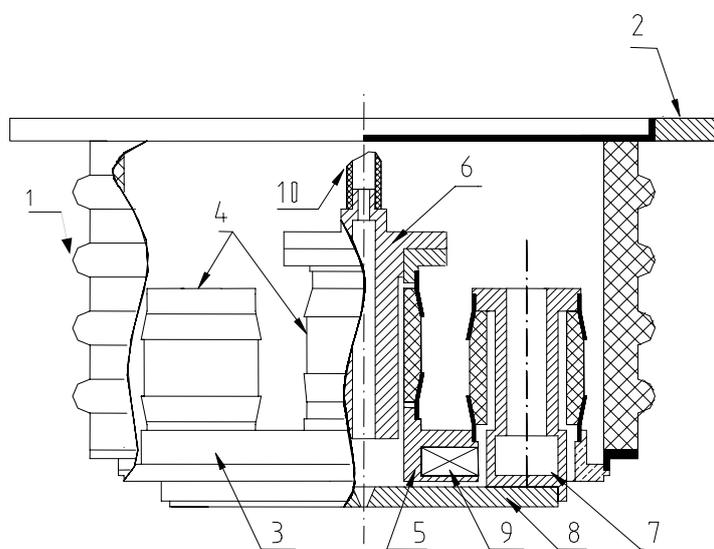


Рис. 2. Конструкция разрядной камеры: 1- высоковольтный изолятор, 2 – кольцо, 3 - анодный блок, 4 - межэлектродные изоляторы, 5 – анод, 6 - полый катод, 7 - радиатор эмиттерного катода, 8 - эмиттерный катод, 9 - магнит, 10 – трубка напуска газа.

Анодный блок 3 содержит опорные изоляторы 4, приваренные к аноду 5 разрядной камеры. На центральном опорном изоляторе устанавливается съемный полый катод 6, остальные изоляторы предназначены для крепления съемного радиатора охлаждения 7 катода 8 с эмиссионным отверстием (эмиттерного катода) и электрической изоляции катода. Катод 8 устанавливается на радиатор, внутренний объем которого соединяется с объемом пушки, заполненным маслом. В анодном блоке размещен магнит 9, создающий в разрядной камере магнитное поле с индукцией порядка 0,01 Тл.

В процессе длительной непрерывной работы электроды разрядной камеры могут нагреваться. В связи с этим пушках имеется система охлаждения. При малых (до 100 мА) токах разрядная камера охлаждается конвекцией трансформаторного или касторового

Наибольшее применение нашли несколько конструкций разрядных камер, ставших базовыми для пушек с различными параметрами [6-8].

В пушках с рабочим током до 0.5 - 0.6 А основу разрядной камеры и пушки в целом составляет сварной металлокерамический узел, состоящий из высоковольтного изолятора 1 (рис.2) и приваренных к его манжетам кольца 2 и анодного блока 3.

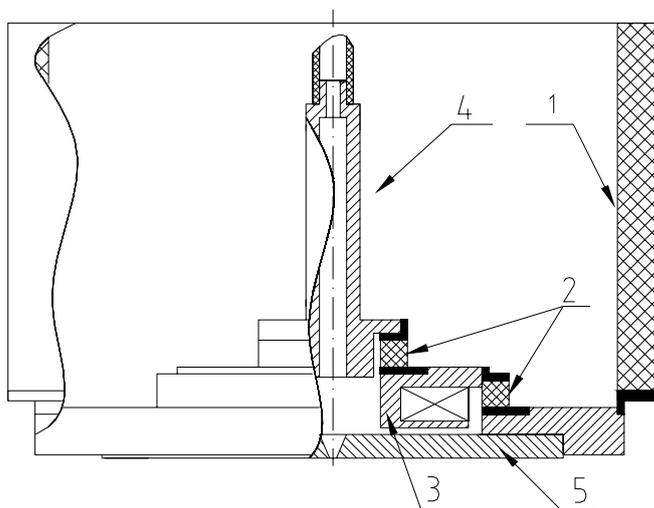


Рис.3. Конструкция разрядной камеры: 1,2 - металлокерамические изоляторы, 3 – анод, 4 – диэлектрической трубки 10 через полый катод, 5 – эмиттерный катод.

масла, залитого в корпус пушки. В случае необходимости используется дополнительное охлаждение масла водяной рубашкой в корпусе пушки.

Для работы разрядной камеры необходим дозированный напуск газа. Рабочий газ через регулятор напуска поступает в разрядную камеру по каналу в полой катод.

В последнее время на основе имеющегося опыта эксплуатации создана новая конструкция разрядной камеры (рис.3) пушек с плазменным катодом [6,7]. Камера используется в пушках мощностью до 5 кВт. В разрядной камере уменьшено количество разъемных уплотнений, что значительно повысило надежность конструкции.

Эмиттерный катод выполнен съемным для облегчения профилактики разрядной камеры после длительной эксплуатации пушки. Полый катод имеет вставку, которая легко извлекается и может быть заменена при заметной эрозии ее рабочей части.

Применение пушек с плазменным катодом в сварочном производстве.

Наиболее широкое промышленное применение электронные пушки с плазменным катодом нашли в сварочном производстве [7-11]. На Новосибирском заводе химконцентратов (АО «НЗХК») пушки с плазменным катодом эксплуатируются на поточных линиях герметизации тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) атомных станций [10,11]. В ТВЭЛах ядерное топливо помещается в герметичную тонкостенную металлическую оболочку. Герметичность оболочки является основным показателем, определяющим работоспособность ТВЭЛа при его эксплуатации в реакторе. Целостность оболочки ТВЭЛа должна сохраняться в течение всего срока его работы, который в зависимости от типа и условий работы ТВЭЛа может достигать нескольких лет.

Оболочки ТВЭЛов изготавливаются в основном из сплавов циркония или алюминия. Сварной шов ТВЭЛа имеет относительно небольшую длину. Однако, из-за значительных объемов производства ТВЭЛов суммарная длина сварных швов, выполняемых в течение года, может достигать нескольких десятков километров. Выпуск большого объема однотипных изделий может быть достигнут в условиях

автоматизированного поточного производства. Поточное производство предъявляет повышенные требования к надёжности и стабильности работы оборудования технологических линий. В состав сварочных линий, как правило, входят специализированные установки с непрерывной подачей изделий в зону сварки, с использованием шлюзовых камер и устройств. Высокая производительность и ритм работы таких линий допускают остановки оборудования лишь на короткое время. Электронные пушки с термокатодными узлами не могут в полной мере удовлетворить требования поточного производства в основном из-за ограниченного ресурса. Использование с плазменным катодом позволяет увеличить время работы установок до профилактики в несколько раз [10] и довести количество сварок ТВЭЛов с оболочками из сплава циркония до 16000 и ТВЭЛов из алюминиевых сплавов до 80000 [11].

На рис. 4 показан внешний вид пушки, на рис. 5 – автоматическая линия сварки ТВЭЛов, оснащенная пушками с плазменным катодом.

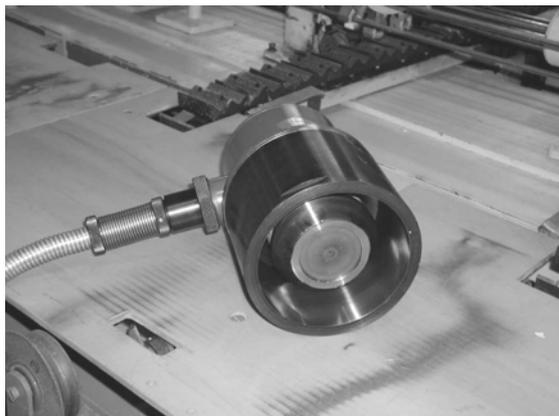


Рис. 4. Внешний вид пушек с плазменным катодом.



Рис. 5. Автоматическая линия электронно-лучевой сварки ТВЭЛов атомных станций, оснащенная пушками с плазменным катодом.

Опыт применения электронных пушек с плазменным катодом показал, что пушки практически не имеют ограничений по условиям эксплуатации, типичным для электронно-лучевой сварки. Кроме того, низкая чувствительность пушек к изменению вакуумных и газовых условий в рабочей камере определяет возможность разработки на их основе новых технологий сварки. На рис. 6 показан внешний вид пушки с плазменным катодом на установке для сварки массивных спрессованных циркониевых брикетов (рис. 7). Сваренные брикеты используются в атомной промышленности в качестве электродов для первичного переплава циркония. В результате механического сдавливания прессом исходного материала брикеты приобретают пористую структуру из наклепанных зерен. Из-за пористой структуры сварка циркониевых брикетов сопровождается, как правило,

большим газовыделением. Исследования химического состава образцов исходного циркония показали, что поры и трещины прессованных брикетов содержат углеводородные загрязнения, серу, азот, оксид циркония, а также хлор^{*)}.



Рис. 6. Электронная пушка с плазменным катодом на установке для сварки циркониевых брикетов.

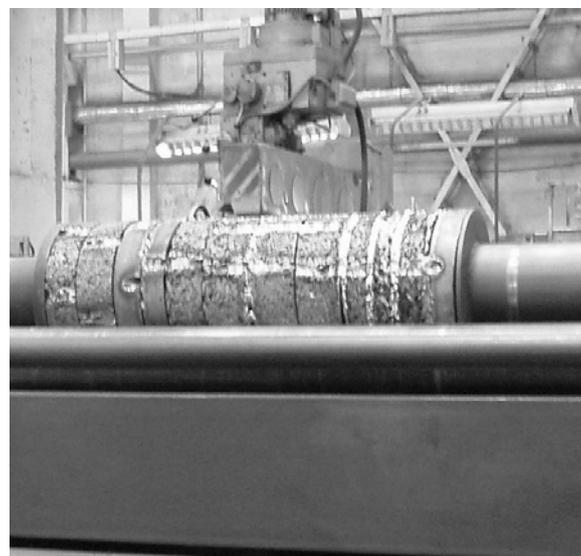


Рис. 7. Оплавленные циркониевые брикеты в манипуляторе установки.

По технологии сварки необходимо выполнить не менее шести продольных проходов с небольшой скоростью. Интенсивный поток высокотемпературных паров циркония способен вызвать изменение эмиссионных свойств термокатода после сварки небольшого числа изделий. Пушки с плазменным катодом обеспечили более высокий ресурс, что позволило в целом увеличить производительность сварочного процесса.

Применение пушек с плазменным катодом для электронно-лучевой наплавки порошковых материалов

Сварочные пушки с плазменным катодом эффективно используются для создания различных покрытий путем наплавки порошковых материалов [7-9,12]. Электронно-лучевая наплавка привлекательна тем, что обеспечивает необходимые защитные свойства покрытий, практически не меняя исходной структуры наплавляемой детали.

В 2006г. на Западно-Сибирском металлургическом комбинате (г.Новокузнецк) запущена в эксплуатацию установка для нанесения термоизносостойких покрытий^{**)}, внешний вид которой показан на рис. 8. В состав установки вошли две электронные пушки с плазменным катодом (рис.9), установленные внутри камеры на двухкоординатном

^{*)} Результаты исследований представлены специалистами ОАО НИТИ «Прогресс», г.Ижевск.

^{**)} Установка создана под руководством Белюка С.И., ст. н. сотр. ИФПМ СО РАН, г.Томск.

манипуляторе. Внутрикамерный вариант расположения пушек, впервые примененный в созданной установке, потребовал решения ряда специфических для пушек с плазменным

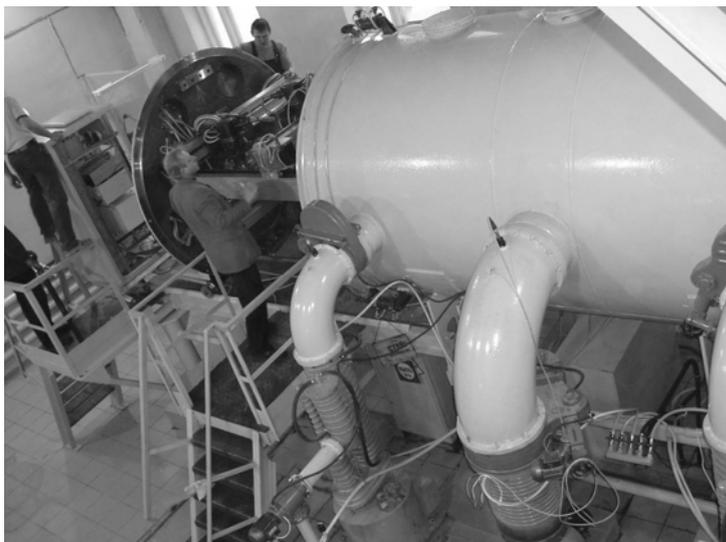


Рис. 8. Внешний вид установки для нанесения термоизносостойких покрытий.

катодом задач. В частности, была создана специальная малоинерционная система напуска газа на базе стандартного регулятора РРГ-10 с управлением, встроенным в автоматизированную систему управления установкой.

Для электрического питания пушек использованы два независимых энергокомплекса ***). Режимы работы пушек и их перемещение внутри камеры задаются индивидуально для каждой пушки

автоматизированной системой управления. На рис. 10 показано изображение, которое выводится на монитор системы управления для визуального контроля за работой



Рис. 9. Внешний вид пушки без фокусирующей линзы.

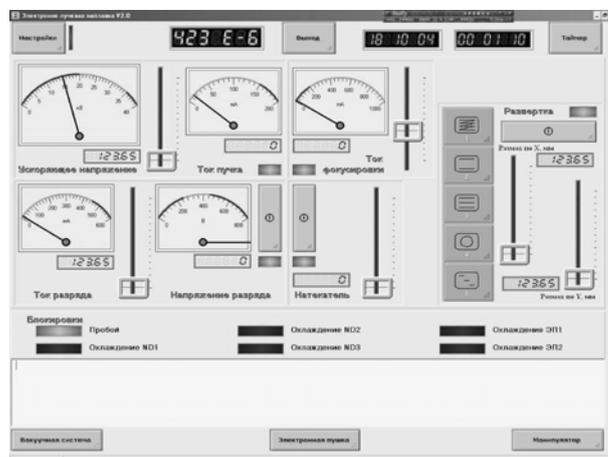


Рис. 10. Монитор управления аппаратурой электропитания пушки.

аппаратуры и ручного управления параметрами пушки при необходимости.

Заключение.

Опыт промышленного эксплуатации пушек с плазменным катодом показывает, что их применение позволяет упростить электронно-лучевое и вакуумное оборудование,

***) Системы электропитание и управления установкой созданы в ООО «ТИЭМ», г.Томск.

увеличить интервал времени между обязательными профилактическими работами и в итоге значительно повысить экономическую эффективность технологических процессов сварки и наплавки покрытий.

Список литературы

- [1] *Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М: Энергоатомиздат. 1989. 256 с.
- [2] *Галанский В.Л., Груздев В.А., Осипов И.В., Ремпе Н.Г.* // Физика электронных источников с высокой яркостью пучка на основе отражательного разряда с полым катодом. В кн. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером. Екатеринбург: УИФ "Наука". 1993. С.12.
- [3] *Galansky V.L., Gruzdev V.A., Osipov I.V., Rempe N.G.* // Journal of Physics D: Appl. Phys. 1994. №27. P.53.
- [4] *N.Rempe and I.Osipov* // Review of Scientific Instruments. 2000. V.71, № 4, P. 1638.
- [5] *Gushenets V.I., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Rempe N.G.* // Laser and Particle Beams. 2003.V. 21. No.2. P. 123-138.
- [6] *Rempe N.G.* // Industrial Use Of Plasma-Cathode Electron Guns. - 7-th international conference on electron beam technologies. Varna, Bulgaria. 2003. P. 144 – 150.
- [7] *Белюк С.И., Осипов И.В., Ремпе Н.Г.* // Известия вузов. Физика. 2001. т.44. № 9. С.77-84
- [8] *Rempe N.G., Osipov I.V., Troyan O.E.* // Proc. of Int. Conf. «Welded Structures». Kiev. 2000. P. 119.
- [9] *Bugaev A.S., Vizir A.V., Gushenets V, et.al.* // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. No. 2, P. 139-156.
- [10] *Васильков В.И., Кислицкий А.А., Онучин Н.В. и др.* // Автоматическая сварка. 2002. № 6, с.38 – 40.
- [11] *Волков А.А., Пчёлкин Р.Д., Ремпе Н.Г.* // Сварочное производство. 2001. № 1. С. 23.
- [12] *Панин В.Е., Белюк С.И., Дураков В.Г., Прибытков Г.А., Ремпе Н.Г.* // Сварочное производство. 2000. № 2. С. 34.